基于 TMSR-PNS 的宽能区中子束流监测器的模拟研究

陈怡 [1,2] 伍建辉 [1,2] 邹春燕 [1,2] 胡继峰 [1,2] 陈金根 [1,2] 蔡翔舟 [1,2]
1（中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800）
2（中国科学院 北京 100049）

摘要 针对钍基熔盐堆白光中子源（TMSR-PNS）在运行过程中出现中子束流掉束或打火导致的束流不稳定的问题，有必要设计研发一种具有高计数率、低中子束流影响、高中子/伽马甄别性能的中子束流监测器。基于蒙特卡洛模拟软件 Geant4 系统研究了薄膜塑料闪烁中子束流监测器的中子转换层厚度、闪烁体厚度、以及外壳材料等关键参数对薄膜闪烁体的影响规律，分析结果表明：闪烁体中子转换层厚度约为 2 um 时具有相对合适的本征探测效率，闪烁体厚度为 2 mm、甄别阈值为 0.1 MeV 时监测器具备伽马射线不灵敏性能。同时，通过对比不同外壳材料对于 γ 射线产生电子的影响，选取电子产生较少的铁作为外壳材料。研究结果可为后续的中子束流监测器实物制备提供理论依据。

关键词 白光中子源；中子束流监测器；Geant4
中图分类号 TL816.3

Simulation study of a wide energy range neutron beam monitor for TMSR-PNS

ChEN Yi[1,2] WU Jianhui[1,2] ZOU Chunyan[1,2] HU Jifeng[1,2] Chen Jingen[1,2] Cai Xiangzhou[1,2]
1(*Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)
2(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract **[Background]**:In response to the issue of neutron beam instability or misfire during the operation of the Thorium Molten Salt Reactor with a Particle and Neutron Source (TMSR-PNS), it is necessary to design and develop a neutron beam monitor with high counting rate, low neutron beam perturbation, and high neutron/gamma discrimination capability. **[Purpose]**: This study aims to investigate the influence of structural parameters of neutron beam monitors on their performance. **[Methods]**: Firstly, considering that the energy spectrum of TMSR-PNS mainly focuses on the energy range from thermal neutrons to 1 MeV, LiF was chosen as the neutron conversion material. The SRIM program was used to calculate the range of secondary charged particles in the neutron conversion layer and the scintillator, providing a preliminary reference for determining the thickness. Subsequently, a relevant physical model was established using Geant4, irradiating with neutrons and gamma rays of different energies. Finally, the simulation results were used to determine the effects of parameters such as neutron conversion layer thickness, scintillator thickness, metal shell, and the placement angle of the PMT on the detector performance. **[Results]**: The neutron conversion layer thickness of the scintillator is relatively suitable at about 2 μm for intrinsic detection efficiency. With a scintillator thickness of 2 mm and a discrimination threshold of 0.1 MeV, the detector demonstrates insensitivity to gamma rays. Additionally, by comparing the impact of different shell materials on electron generation by gamma rays, iron, which produces fewer electrons, was selected as the shell material. **[Conclusions]**: The influence of detector structural parameters on detector performance obtained in this study is of

国家自然科学基金(No.12135019) 资助
第一作者：陈怡，男，1999 年出生，2021 年毕业于成都理工大学，现为硕士研究生，研究领域为核辐射探测技术
通讯作者：伍建辉，E-mail: wujianhui@sinap.ac.cn ;
收稿日期：20XX-00-00，修回日期：20XX-00-00

guiding significance, providing theoretical reference for the subsequent preparation of detectors.

Key words White neutron source, Neutron beam monitor, Geant4

为了满足 TMSR 对钍铀循环核数据的需求，中国科学院上海应用物理研究所设计并建造了电子直线加速器驱动的白光中子源(TMSR-PNS)，用于钍铀循环关键核素核数据的测量[1]。装置主要集中在热中子和慢中子能区，特别是共振区中子截面的测量，为 TMSR 评价数据库提供可靠的总截面和俘获截面的测量数据[2]。

由于白光中子源装置可能出现的掉束或打火等问题，入射中子束的通量会随时间发生变化[3]。为了减少中子束流不稳定造成的误差，除在白光中子源束流末端的主探测器外，还需要配备中子束流监测器。目前，TMSR-PNS 将中子束流监测器布置于偏离中子束流一侧的末端以降低对中子束流的影响，但该布置方式无法实时精确测量强中子/伽马辐照背景下入射到样品靶上的中子通量。为了解决这一关键问题，有必要设计出一种具有高计数率、低中子束流影响、高中子/伽马甄别性能的中子束流监测器。

涂硼 GEM 中子束流监测器由于计数率高、位置分辨能力强和对中子束流影响小等优点被广泛应用于各类中子源中，在中国散裂中子源(Chinese Spallation Neutron Source)首期建设的三台谱仪上都安装了 7 台基于陶瓷 GEM 的飞行时间二维位置灵敏中子束流监测器[4]。然而，相较于 CSNS，TMSR-PNS 环境特殊，实验大厅面积较小，中子飞行管道仅 6 m，由于中子束流监测器主要用于测量中子通量而非进行位置分辨，且需要适应狭小的安装环境，因此 GEM 气体探测器不适宜用于 TMSR-PNS。SiC 等宽带隙半导体具有优异的抗辐照性能[5]，也已广泛应用于中子束流监测器。蒋勇[6]等人使用 SiC 探测器对中子束流进行了监测，并研究开发了一款用于绵阳研究堆飞行时间中子反射仪的中子束流监测器。刘金龙[7]通过氧原子等离子体处理技术控制了杂质注入，成功制备了低杂质高质量的单晶金刚石，并在中国散裂中子源上进行了中子监测实验，实验结果显示，该金刚石探测器能有效进行中子脉冲能量监测，具有高可靠性的 TOF 谱，且受探测器波动的影响小，证明其适用于快中子束流监测。然而，受到生长工艺技术的限制，新型半导体材料难以制作大面积器件，其内部缺陷还可能作为电荷俘获中心，信噪比降低，限制了其作为束流监测器的计数率[8]。薄膜闪烁体探测器具有时间响应快、抗辐照性能优异、中子伽马甄别性能强、中子束流影响小等优点[9]，此外结合中子转换层，可以同时测量热中子，是实现高精度中子束流监测的理想探测器之一。

基于上述考虑，本论文结合 TMSR-PNS 运行特点并基于蒙特卡洛模拟软件 Geant4，系统分析了薄膜闪烁体探测器作为中子束流监测器时，中子转换层类型与厚度、闪烁体厚度、以及外壳材料等结构参数对探测器性能的影响规律，研究成果可为后续中子束流监测器样机的制作提供理论依据。

1 原理与模拟对象

1.1 探测器探测原理

薄膜闪烁探测器主要由金属外壳、中子转换层、塑料闪烁体、偏转磁铁和光电转换器件构成，其结构如下图 1 所示。

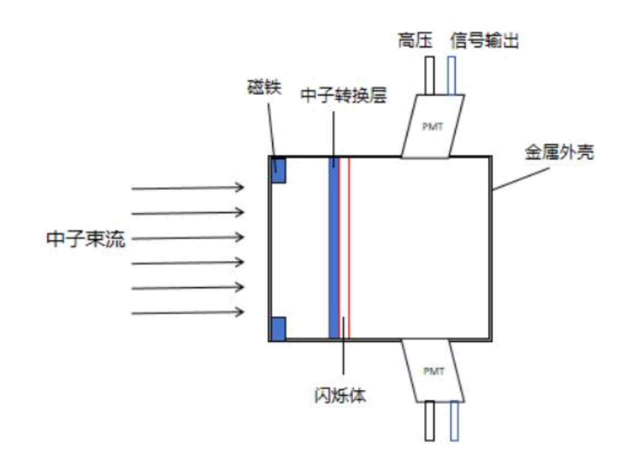


图 1 薄膜闪烁探测器示意图
Fig.1 Schematic diagram of scintillator detector for neutron beam monitoring

外壳采用散射中子少且产生电子数量有限的金属材料制成，主要功能是封装保护闪烁体和光电转换器件。偏转磁铁的作用是偏转伽马射线和外壳反应生成的电子，以减少本底。中子转换层与塑料闪烁体构成了监测器的核心探测部分，它们与光电转换器件配合，用于产生光电信号。该中子束流监测器的探测原理基于以下过程：热中子在与中子转换层反应时产生次级带电粒子，而快中子在与闪烁体反应时则产生反冲质子。这些粒子在闪烁体中沉积能量并产生可见光子。这些光子被置于两侧的光电转换器件的光阴极捕获，从而产生电流信号。

后续模拟研究中使用的闪烁体是 Eljen Technology 公司生产的 EJ212 塑料闪烁体，其是专门为在薄片情况（小于 5 mm）下使用而制造的闪烁体，可以用于探测α、β、γ以及中子辐射。塑料闪烁体 EJ212 的衰减时间较短，使其能够在强中子束流中具有高计数率。此外，与其他闪烁体相比，塑料闪烁体具有更强的抗辐射性。EJ212 的物理特性如下表 1 所示。

表 1 EJ212 塑料闪烁体物理特性[3]
Table 1 Physical properties of EJ212 plastic scintillator

性能	设计值	单位
光输出	65	%蒽
探测效率	10000	光子/1MeV 电子
最大出射波长	423	nm
密度	1.023	g/cm^3
上升时间	0.9	ns
衰减时间	2.4	ns
C 原子数密度	4.69×10^{22}	$/cm^3$
H 原子数密度	5.17×10^{22}	$/cm^3$
电子数密度	3.33×10^{23}	$/cm^3$
折射率	1.58	

常见的中子转换材料有 ^{6}Li、^{10}B、^{157}Gd，这些核素通常对热中子具有较高的热中子吸收截面。^{157}Gd 具有最高的热中子反应截面(24000 barn)，但是其与中子反应后产生不同能量的γ射线和内转换电子，导致其中子/伽马甄别性能较差；10B 的热中子反应截面为 3840 barn，且与 157Gd 相似，同样会放出 0.48 MeV 左右的γ射线，不利于中子/伽马甄别；^{6}Li 的热中子反应截面虽然不高，只有 940 barn，但其反应能较大，产生的次级带电粒子所携带的动能较大，易于与γ射线区分。由于单质锂在空气中容易氧化，因此选择锂的稳定化合物 LiF 作为中子转换层材料。

该中子束流监测器有如下优势：中子束流只需穿过金属外壳的前后窗、中子转换层和闪烁体，这种设计尽量减少了布置在中子路径上的物质量，以最小化对中子束流的干扰；塑料闪烁体与中子转换层的组合有效扩展了中子探测的能量范围；薄膜闪烁体的使用使得次级带电离子能够在其中沉积大部分能量，而由

伽马射线产生的康普顿电子在其中的能量损失相对较少，从而能够降低对伽马射线的灵敏度。

1.2 模拟测量对象

TMSR-PNS 是基于 15MeV 电子加速器驱动的白光中子源。电子加速器产生 15MeV~20MeV 的脉冲电子，经过磁铁偏转后轰击钨靶，产生韧致辐射产生高能 X 射线，高能 X 射线与靶核发生光核反应产生初级中子（峰值 1MeV），初级中子经过合适厚度的聚乙烯慢化体后产生具有连续能谱的中子分布[2]。中子出射通道处经过慢化体后的中子/伽马射线能谱如下图 2 所示。

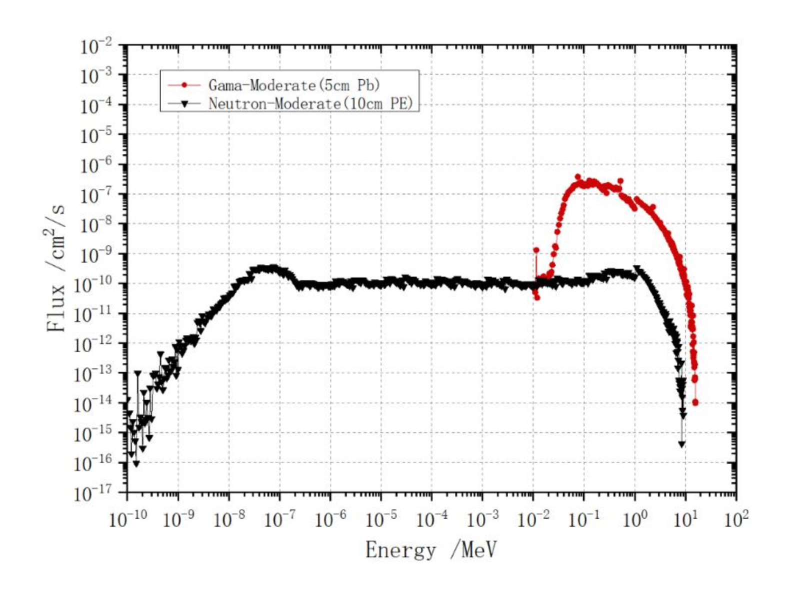


图 2 模拟计算中使用的中子及伽马能谱
Figure 2 Neutron and gamma spectra of TMSR-PNS

TMSR-PNS 是用于钍铀燃料循环链上的中子核反应截面数据的测量，因此经过慢化后的中子能谱在 1MeV 和热中子能区分布较多，可以认为中子能区主要分布在 0.0253eV~1MeV 区域；而 γ 射线能量分布在 0.01MeV 到 10MeV 区域，峰值在 0.1MeV。

2 探测器模拟

2.1 中子转换层厚度的模拟

首先，使用 SRIM（Stopping and Range of Ions in Matter）软件计算了中子转换层和塑料闪烁体当中的次级带电粒子的射程，为后续模拟研究设置中子转换层以及塑料闪烁体的厚度提供初步参考。结果如下表所示：

表 2 次级带电粒子在中子转换层和闪烁体当中的射程
Table 2 The range of secondary charged particles in the neutron convention layer and the scintillator

材料	次级带电粒子	射程/um
LiF	α（2.05 MeV）	6.1
	氚核（2.73 MeV）	32.1
闪烁体	α （2.05 MeV）	10.31
	氚核（2.73 MeV）	60.04

在研究热中子本征探测效率时，中子转换层的厚度是一个关键因素。随着 LiF 转换层厚度的增加，理论上会产生更多的次级粒子，从而提高探测效率。然而，探测效率不是简单地随着转换层厚度的增加而线性提升。增加厚度意味着次级粒子在转换层内的能量损失也会增加，这导致了部分粒子在到达后续闪烁体之前就已经损失大部分甚至全部能量，导致探测效率的下降。利用 Geant4 模拟了不同厚度转换层情况下的热中子探测效率，模拟结果展示在图 3 中。在图中可以明显观察到，随着 LiF 层厚度的增加，热中子的探

测效率先是上升至一个峰值，然后因为中子转换层对次级带电粒子的自吸收的影响而逐渐下降。模拟结果显示，当 LiF 的厚度达到 30 微米时，探测效率达到最大，约为 3.6%。

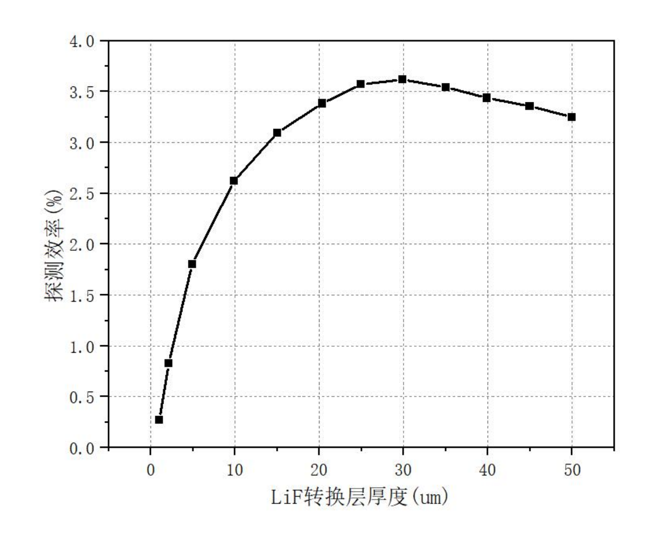


图 3 探测效率与转换层厚度的关系

Figure 3 Relationship between detection efficiency and conversation layer thickness

下图 4 是转换层不同厚度下，出射到闪烁体当中的次级粒子的能量沉积谱，当厚度为 1um 时，2.05 MeV 的α峰和 2.73 MeV 的 T 峰清晰可见，由于α粒子在中子转换层中的电离能损大于氚核在其中的能损，α粒子更容易被阻挡在转换层中，因此 T 峰的计数更高。随着转换层厚度的增加，两个粒子从转换层出射的概率减少，次级粒子α和 T 的峰被快速展宽，并且由于自吸收严重，α 与 T 的能谱重叠在一起，不利于中子伽马甄别性能。

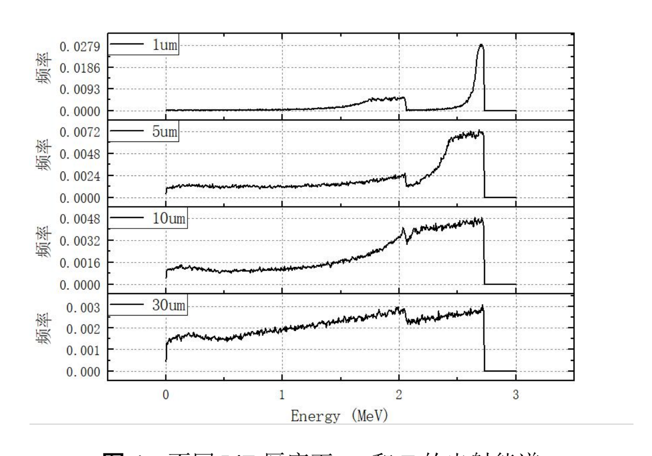


图 4 不同 LiF 厚度下，α和 T 的出射能谱

Figure 4 Emission energy spectra of α particles and tritons at various LiF thickness

对中子束流监测器而言，中子探测效率一般要求在 0.1%~1%之间[11]，根据探测效率折扣考虑 LiF 的厚度，确定其厚度为 2 um，此时本征探测效率为 1%。

2.2 薄膜闪烁体厚度的模拟

塑料闪烁体作为探测器的灵敏层，其厚度的选择取决于两个因素：（1）次级带电粒子的能量能够在塑料闪烁体当中完全沉积，保证中子脉冲信号幅度足够大；（2）次级带电离子完全沉积的同时，尽可能薄，以实现足够高（1000 倍）的中子伽马灵敏度比。根据上一小节中子转换层的模拟结果，在设定中子转换层为 2 um 厚度的 LiF 基础上进一步探讨不同厚度的闪烁体对探测器性能的影响。

根据表 2 中中子转换层产生的次级带电粒子中能量更大的氚核（2.73 MeV）在塑料闪烁体中的射程，为保证带电粒子能够在其中沉积全部能量，要求塑料闪烁体厚度应大于 61 um。

在闪烁体和光电倍增管相同的情况下，中子与伽马的相对灵敏度仅与单位强度射线入射到闪烁体中产生的闪烁光子数有关，因此可以通过 Geant4 模拟中子和伽马射线的相对灵敏度以确定闪烁体厚度。在 Geant4 模拟程序中，设定模拟中子能量为热中子，伽马能量为 1 MeV，每种射线发射的粒子数 N=10^7。改变塑料闪烁体的厚度从 0.1 mm 到 1 mm，计算闪烁体对中子和 γ 射线的光产额 L_n 和 L_γ，设中子/伽马灵敏度比 K 为：

$$K = L_n / L_\gamma \tag{1}$$

由于次级带电粒子在闪烁体当中的能量损失比伽马射线与闪烁体相互作用产生的电子高约两个量级，因此电子的射程远大于次级带电粒子。由图 5 可以看出，K 随着塑料闪烁体厚度的减少而增大，当厚度低于 0.3 mm 时，K>10。

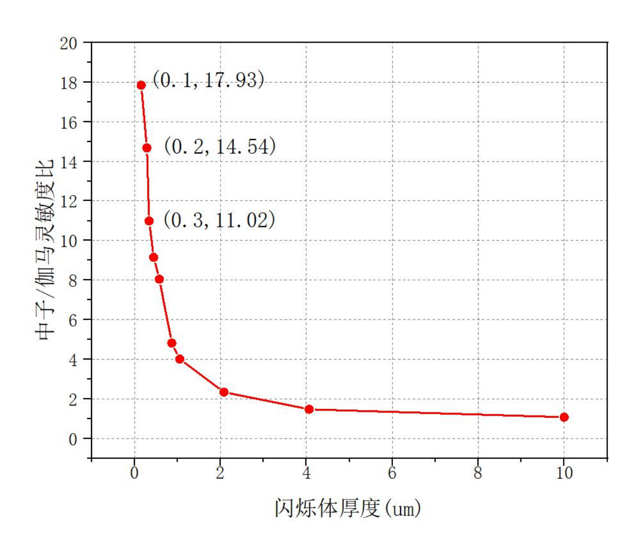


图 5 中子/伽马灵敏度比随闪烁体厚度的变化
Figure 5 Variation of neutron/gamma sensitivity ratio with scintillator thickness

尽管如此，探测器尚未达到对 γ 射线灵敏度较低的要求（中子伽马灵敏度比达到 1000 倍），还存在中子/伽马甄别困难的问题。为了进一步降低 γ 射线的干扰，采用设置 γ 甄别阈值的方法提高中子束流监测器的中子/伽马甄别性能。

首先，通过模拟得到在塑料闪烁体当中产生的次级带电粒子的能量沉积分布来确定合适的 γ 射线甄别阈值的范围。由图 4 和图 6 可知，中子的次级带电粒子的能量沉积主要集中在 0~2.73 MeV，而伽马射线产生的次级电子数量随闪烁体厚度的增加而增加，其能量主要集中在 0~0.6 MeV。据此，将 γ 射线的甄别阈值设定在 0~0.6 MeV 之间。

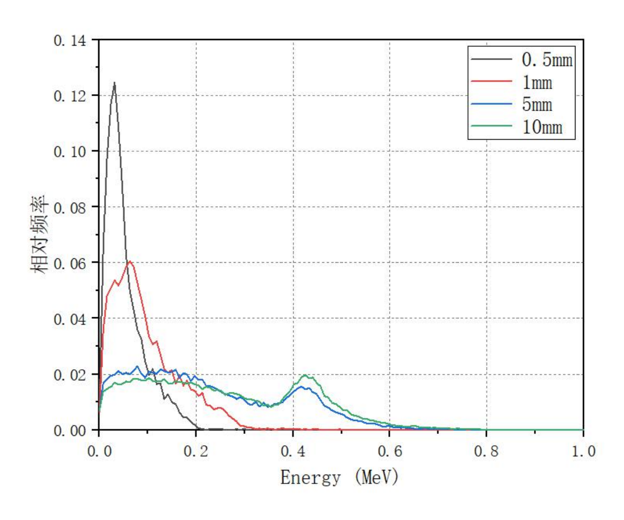


图 6 γ 射线产生的次级电子在闪烁体中的能量沉积
Figure 6 Energy deposition of secondary electrons produced by gamma in scintillator

通过以下公式计算了在 0~0.6MeV 的 γ 射线甄别阈值范围内中子和 γ 射线的探测效率的损失率：

$$\varepsilon = \frac{L_0 - L}{L_0} \tag{2}$$

式中：ε 表示由于设置甄别阈值而损失的探测效率；L_0是不设置甄别阈值时的探测效率；L是设置不同甄别阈值时的探测效率。从下图 7 可以看出，随着甄别阈值的提高，中子以及 γ 射线的探测效率逐渐下降。由于中子产生的次级粒子主要能量分布在 0.6MeV 以上，因此中子探测效率的降低较为缓慢。当甄别阈值设定为 0.6MeV 时，中子探测效率的损失率约为 10%左右。相比之下，γ 探测效率的下降更为显著，同一阈值下，γ 探测效率的损失率超过了 98%，这表明设定 γ 甄别阈值是极其有效的，可以显著减少 γ 信号的干扰。

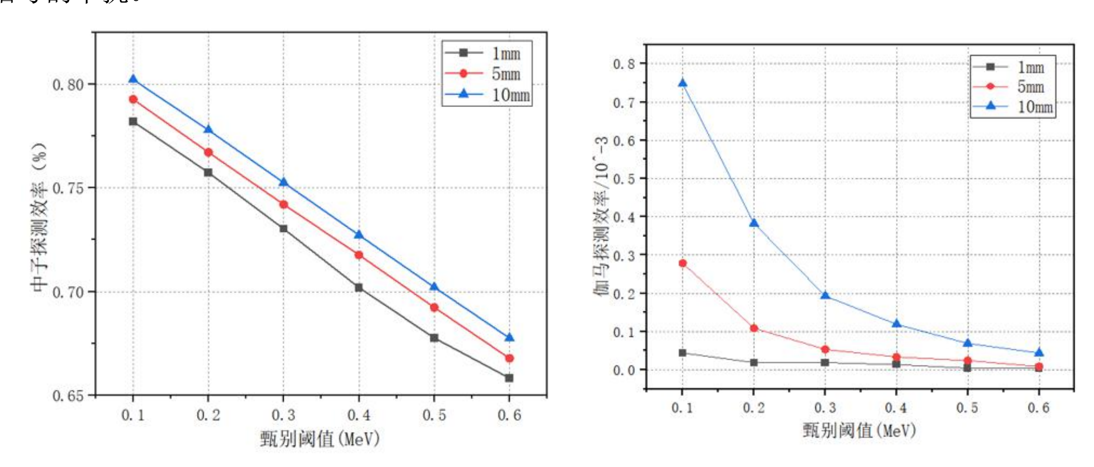


图 7　不同甄别阈值下中子和伽马的探测效率

Figure 7　Detection efficiency of neutrons and gamma at different discrimination thresholds

通过模拟得到了不同塑料闪烁体厚度、不同 γ 甄别阈值下的中子/伽马灵敏度比，结果见图 8。由图 8 可知，有多种甄别阈值和闪烁体厚度的搭配可以使中子/伽马灵敏度比达到 1000 倍的要求，为了减少中子探测效率的损失率，最后选择闪烁体厚度为 2 mm，γ 甄别阈值为 0.1 MeV，即可满足中子/伽马灵敏度比达到 1000 倍的要求，此时可认为探测器对 γ 射线不灵敏。

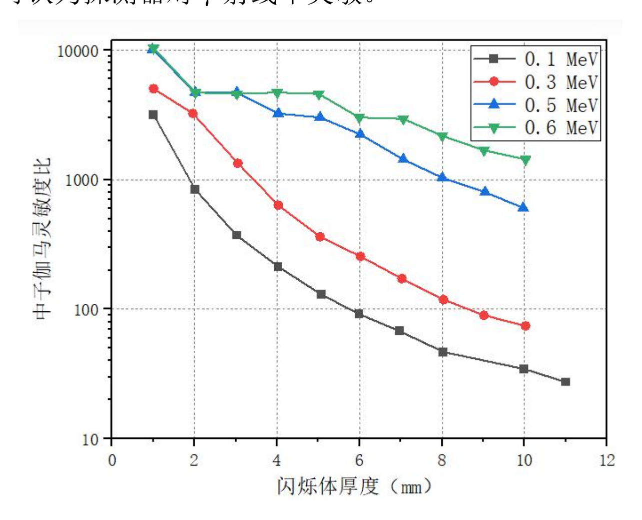


图 8　不同闪烁体厚度下，4 组能量甄别阈值下的中子/伽马灵敏度比

Figure 8　Neutron/gamma sensitivity ratio under different scintillator thicknesses and four energy discrimination thresholds

2.3　金属外壳

在闪烁探测器的设计中，外壳材料的选择是至关重要的，以确保设备的结构强度和降低噪声信号的干扰。通常，铝或铁等金属材料被用作外壳，因为它们能提供必需的机械强度。然而，这些金属外壳在与 γ 射线相互作用时也会产生影响。例如，γ 射线与金属的入射窗接触时，它会激发出大量的电子。这些电子

进入到闪烁体中，形成背景噪声信号，影响探测器的性能。为了深入了解不同材料对噪声信号的影响，可以通过模拟程序观察γ射线入射到铁壳和铝壳时的情况，并统计出射电子的能量分布。

在 Geant4 中设定入射的γ射线能量为 1 MeV，粒子数目为 10^7，这些粒子均匀且平行地入射到尺寸为 ϕ 50mm×1mm 的铁壳或铝壳上。在这些的壳体的入射窗后方放置一个大小与壳体相同、厚度极薄的几何体，内部填充材料为真空，可以记录外壳中逸出的电子数量和能量。通过模拟得到的电子能谱显示在图 9 中。

由图 9 可见，两种外壳材料逸出的电子大部分能量在 0~0.8 MeV 之间，铝外壳相较于铁壳产生了更多的出射电子。从铝壳和铁壳表面出射的电子的总数目分别为 50737 和 39135，对所有出射电子能量求和，其电子携带的总能量分别为 23245.18 MeV 和 18737.580 MeV。对比两种材料产生的额外电子数量和总能量，选择出射电子数目和能量更小的铁作为中子束流监测器的外壳材料。

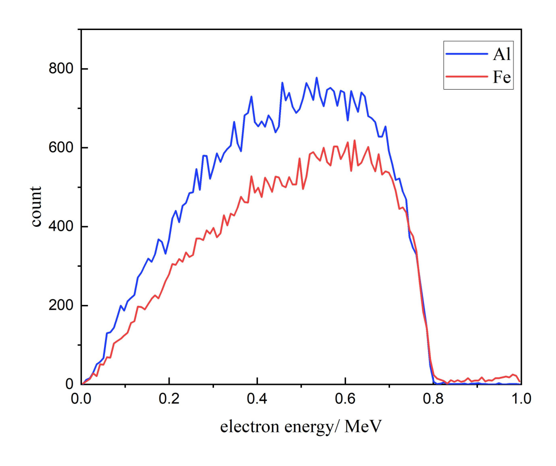


图 9 铁、铝两种材料出射电子能谱比较
Figure 9 Comparison of emission electron spectra between iron and aluminum materials

2.4 偏转磁铁

在使用铁作为中子束流监测器的外壳材料之后，需要使用 Geant4 进行模拟，以研究铁壳对中子和伽马射线灵敏度比的影响。在模拟中，设定中子的能量为 0.0253 eV，伽马射线能量为 1 MeV。铁壳厚度设置为 1 mm，而铁壳前窗到闪烁体的距离保持在 10 cm。此外，模拟了厚度为 1 mm、2 mm 和 3 mm 的闪烁体，直径 50 mm，来比较在有无铁壳情况下中子或γ射线产生的光产额变化，结果见下表 3。从表 3 可得：是否有铁壳对中子产生额外的光产额影响极小，而添加铁壳后对伽马射线的光产额有显著提升。

表 3 加铁壳前后粒子的光产额对比

Table 3 Comparison of light yield of particles before and after adding an iron window

薄膜厚度/mm	γ射线		中子	
	加铁壳前	加铁壳后	加铁壳前	加铁壳后
1	0.09	0.14	265.66	264.26
2	0.36	0.48	350.08	344.05
3	0.80	1.02	280.12	283.00

图 10 展示了加装铁壳前后中子与伽马射线灵敏度比的对比。结果表明，添加铁壳使得中子/伽马灵敏度降低。因此，可以考虑在铁壳的前入射窗后安装磁铁，以改变通过铁壳时由伽马射线产生的电子的轨迹，使电子无法到达后续的闪烁体上。铁壳产生的康普顿电子的能量范围大部分集中在 0-0.8MeV 之间。在电子动能最大取 0.8MeV 时，其速度为 0.77c，接近光速，所以在后续计算磁感应强度时应考虑相对论效应。

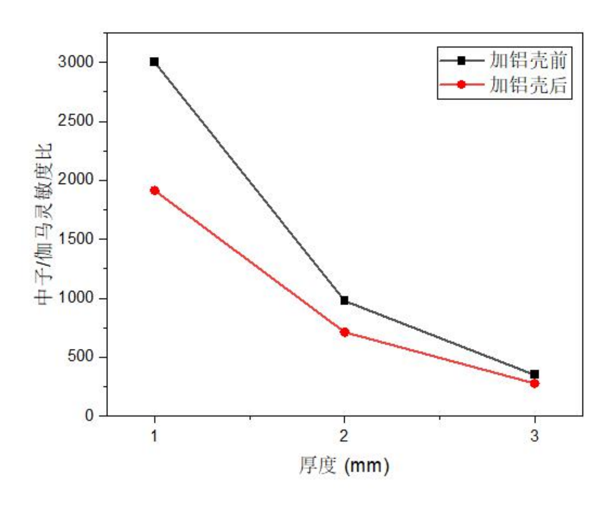


图 10 加铁窗前后中子伽马灵敏度的比较
Figure 10 Comparison of neutron and gamma sensitivity before and after adding an iron window

对于电子，磁感应大小 B 与动能E_k、偏转半径 R 的关系：

$$B=\frac{10000}{3R}\left(\sqrt{E_k^2+1.022E_k}\right) \tag{3}$$

由图 9 可知，1 MeV γ 射线透过金属外壳前入射窗产生的电子最大能量为 0.8MeV，即E_k =0.8 MeV。在铁壳前窗到闪烁体的距离不同时，所需的磁感应强度也会有所不同：随着电子偏转半径的增大，需要的磁感应强度将逐渐减小。代入上述公式（3）进行计算，结果展示在表 4 中。在探测器实物制备时，可以根据金属外壳前窗到塑料闪烁体的距离来选择合适的偏转半径，从而选择合适磁感应强度的磁铁。

表 4 铁壳前窗到闪烁体不同距离对应的磁感应强度
Table 4 Magnetic field strength corresponding to different bending radii

R/cm	3	4	5	6	7	8	9	10
B/gs	1341	1006	804	670	574	503	447	402

2.5 光电倍增管的相对位置

在传统的闪烁体探测系统中，如图 11 左图显示，光电倍增管（Photomultiplier Tube, PMT）通常安置在闪烁体的后面，并通过光导进行耦合，这种结构能有效提高闪烁体产生的闪烁荧光的收集效率。若薄膜闪烁中子探测器采用该 PMT 直接置于闪烁体后方的布局，中子直接照射到光电倍增管的入射窗上，入射窗通常由硅硼玻璃组成，中子或γ射线与其反应产生的干扰信号可能会比闪烁体本身产生的信号更强。此外，对于薄膜塑料闪烁探测器，由于是放置在中子束流上，为了减少对中子束流的影响，PMT 无法放置在闪烁体之后。这种布局设计可能会影响信号的准确性，需要进行优化。与中国散裂中子源上的中子束流监测器方案（除了中子转换材料和基底材料放于中子束线当中，灵敏层放置在束线之外收集中子转换后产生的次级带电粒子）类似[11]，在考虑光电倍增管的位置时，也可将其放置于中子束线之外，如图 10 右图所示。

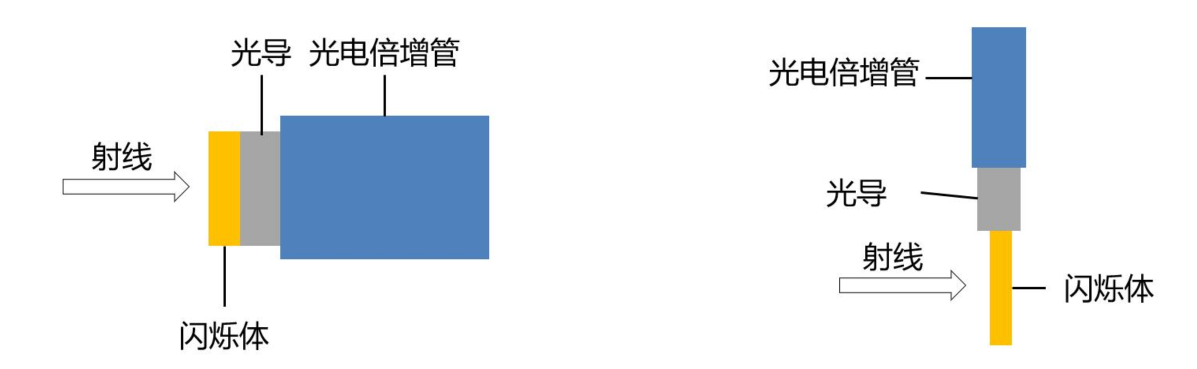


图 11　光电倍增管位置示意图（左：传统；右：PMT 置于侧面）
Figure 11　Schematic diagram of the photomultiplier tube location

图 11 右图的布局虽然避免了中子束流的直接照射，但这种放置方式也同时减少了闪烁荧光的收集效率，这是因为闪烁体通常很薄，闪烁荧光在其中反射时到达侧面的闪烁荧光数量减少。为了在这种情况下最大化闪烁荧光的收集效率，使用 Geant4 模拟得到从闪烁体内发出的闪烁荧光的出射角度分布。

PMT 与塑料闪烁体的摆放方式有下图 12 四种。在塑料闪烁体靠近中子束流入射方向一侧覆有中子转换层，闪烁荧光无法透过其到达 PMT，因此应选择(b)和(d)两种摆放方式。

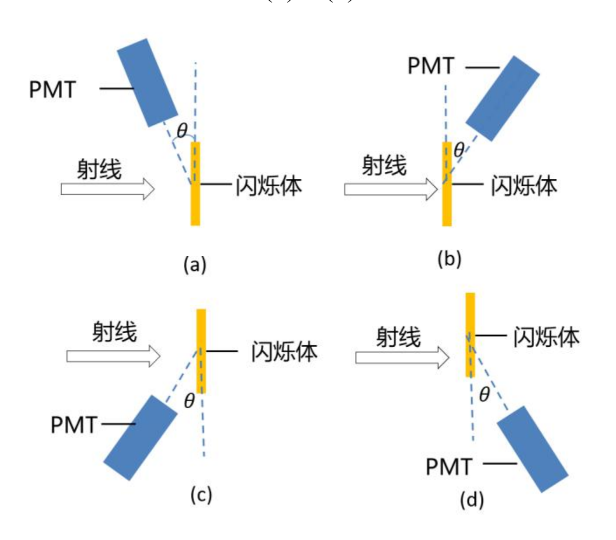


图 12　光电倍增管与闪烁体的四种相对位置
Figure 12　Four relative positions of the photomultiplier tube and scintillator

模拟得到不同塑料闪烁体厚度下，从塑料闪烁体当中出射的闪烁荧光的角度分布，如图 13。当θ为 0°时，闪烁体入射窗与中子束流入射方向平行。在θ约为 20°时，闪烁荧光出射数量最多，且达到最高数量的角度与闪烁体厚度无关，都是在θ为 20°左右。因此，可以在设置光电倍增管的角度分布时，推荐选取θ为 20°的摆放方式以获得最大的光收集效率，即光电倍增管的中轴线与闪烁体发现呈 70°。由于(b)和(d)两种摆放方式沿中子束流入射方向轴对称，因此这两种摆放方式对闪烁荧光的收集效果相同，此时还可以根据光电倍增管的入射窗大小选择多个光电倍增管进行信号的读出。

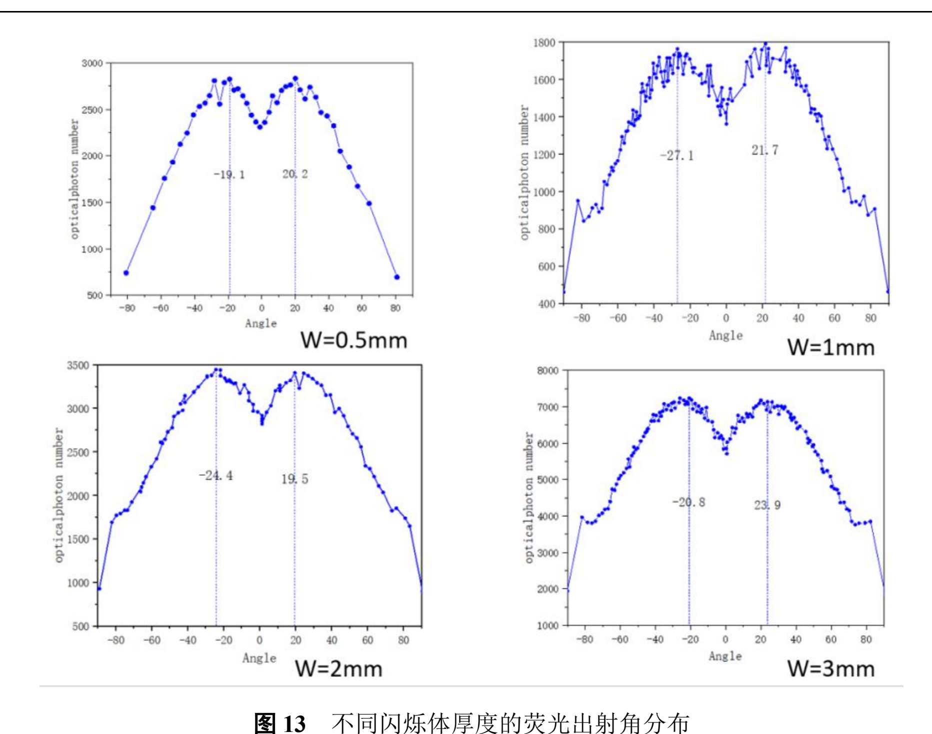


图 13　不同闪烁体厚度的荧光出射角分布

Figure 13　Fluorescence emission angle distribution for scintillators of different thicknesses

3　结语

本文应用 Geant4 蒙特卡洛模拟软件，以 TMSR-PNS 作为研究对象，结合其中子能谱特点，对转换层厚度、塑料闪烁体厚度、外壳材料、偏转磁铁磁感应强度和光电倍增管的相对位置进行了系统研究和理论分析。结果表明：

（1）　根据中子束流监测器低中子转化效率的要求，采用 2 um 厚的 ^{6}LiF 作为中子转换层时，中子束流监测器对热中子的本征探测效率可达到 1%。

（2）　闪烁体厚度低于 0.3 mm 时，中子/伽马灵敏度比大于 10，达不到伽马射线不灵敏的要求，通过添加 γ 甄别阈值的方法，将中子/伽马灵敏度比提高至 1000，以及闪烁体厚度为 2 mm 时，甄别阈值为 0.1 MeV。

（3）　在束流监测器的外壳材料的选择上，铁因其对γ射线穿透时造成的影响较小而被选择为外壳材料。

（4）　可以通过在金属外壳的入射窗后根据需要添加磁铁以减小 γ 射线产生的额外电子对闪烁体的影响。

（5）　在光电倍增管的中轴线与塑料闪烁体的法线之间保持大约 70° 的角度时，闪烁体发出的荧光能够得到最有效的收集。

参考文献

1　王小鹤，胡继峰，刘龙祥，等.TMSR 白光中子源本底屏蔽设计[J].原子核物理评论,2020,37(03):777-783.DOI:10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC38.

2　王小鹤.白光中子源上的熔盐硼当量测量[D].中国科学院大学(中国科学院上海应用物理研究所),2019.DOI:10.27585/d.cnki.gkshs.2019.000001.

3　ELJEN TECHNOLOGY. General purpose EJ-200, EJ-204, EJ-208, EJ-212[EB/OL]. (2023-8)[2024-4-29]. https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-200-ej-204-ej-208-ej-212.

4　周健荣.二维位置灵敏GEM中子探测器研究[D].兰州大学,2020.DOI:10.27204/d.cnki.glzhu.2020.000151.

5 Masri P .Silicon carbide and silicon carbide-based structures: The physics of epitaxy[J].Surface Science Reports, 2002, 48(1-4):1-51.DOI:10.1016/S0167-5729(02)00099-7.

6 梁红伟,廖传武,夏晓川,等.第三代半导体辐射探测器研究进展[J].科技导报,2021,39(14):69-82.DOI:10.3981/j.issn.1000-7857.2021.14.007.

7 刘金龙,魏俊俊,李成明,等.金刚石探测器材料研制与中子探测性能研究[J].真空电子技术, 2021, 000(005):46-53,72.

8 B Y J A , B J W A , B Z L A ,et al.A neutron beam monitor based on silicon carbide semiconductor coated with 6 LiF converter[J].Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, 921(C):14-17.DOI:10.1016/j.nima.2018.12.014.

9 张国光,欧阳晓平,张建福,等.ST-401 薄塑料闪烁体中子能量响应测量技术研究[J].物理学报,2006,(05):2165-2169.DOI:CNKI:SUN:WLXB.0.2006-05-009.

10 Yanfeng W , Zhijia S , Jianrong Z ,et al.Simulation study on the boron-coated GEM neutron beam monitor[J].中国科学 物理学 力学 天文学(英文版), 2013.

11 B Q L A , C G L , C J B ,et al.The 6 LiF-silicon detector array developed for real-time neutron monitoring at white neutron beam at CSNS[J].Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 946:162497-162497.DOI:10.1016/j.nima.2019.162497.